

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MATHEUS DE SOUZA WERNECK COSTA

**CARACTERIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS GERADAS NO PROCESSO DE SOLDAGEM
AO ARCO SUBMERSO E SUA VIAS DE REUTILIZAÇÃO**

BELO HORIZONTE

2018

MATHEUS DE SOUZA WERNECK COSTA

CARACTERIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS GERADAS NO PROCESSO DE SOLDAGEM AO
ARCO SUBMERSO E SUA VIAS DE REUTILIZAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz

BELO HORIZONTE

2018

MATHEUS DE SOUZA WERNECK COSTA

**CARACTERIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS GERADAS NO PROCESSO DE SOLDAGEM
AO ARCO SUBMERSO E SUA VIAS DE REUTILIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 04/07/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz – Orientador

Prof. MSc. João Bosco dos Santos

Prof. Dr. Marcelo Rosa Dumont

Aos meus pais, Aldirene e
José, e aos meus irmãos Tânia e Júlio.

*“Quem elegeu a busca não pode recusar a
travessia...”*

Guimarães Rosa

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por sempre abençoar a mim e a minha família.

Aos meus pais, Aldirene e José, por todo carinho, dedicação, apoio, educação e principalmente por permitirem que me preocupasse apenas com os estudos. Aos meus avós Edite, Álvaro, Paula e Ulisses que junto de meus pais são a base do que sou hoje. Aos meus irmãos Tânia e Júlio pelo apoio e carinho. À Carolina por toda amizade, carinho, preocupação e por ter me acompanhado ao longo dessa jornada dentro do CEFET.

Ao CEFET-MG, aos Departamentos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Materiais, pelo aprendizado que tive e por todas as experiências de vida.

Ao Professor Cláudio por todo apoio e dedicação como Orientador.

Aos meus amigos por toda amizade e apoio.

Muito obrigado!

RESUMO

Atualmente, a quantidade de escória de fluxo de soldagem gerada no Brasil supera dez mil toneladas por ano. Este material é classificado como um resíduo classe II não inerte, devido esta classificação, não pode ser descartado em aterros convencionais, pois podem causar danos ambientais severos. No presente trabalho, escórias de fluxo de soldagem foram geradas pelo processo de soldagem ao arco submerso para realizar a caracterização química, mineralógica e granulométrica das mesmas. A caracterização química revela que as principais substâncias contidas na escória são o Manganês, Alumínio, Silício, Magnésio, Cálcio, Ferro e seus respectivos óxidos, já na caracterização mineralógica notou-se a presença de quatro minerais sendo o Espinélio, a Forsterita, Hercinita e a Fluorita, além disso, a caracterização granulométrica mostra que a escória, quando cominuída, apresenta partículas de diâmetro médio de 0,068 mm, com módulo de finura de 1,47 e dimensão máxima característica de 0,300 mm.

Palavras-chave: *soldagem ao arco submerso, escória, caracterização.*

ABSTRACT

Currently, the amount of welding flux slag generated in Brazil exceeds ten thousand tons per year. This material is classified as a non-inert class II waste, due to this classification, it can not be disposed of in conventional landfill as it may cause severe environmental damage. In the present work, welding flux slags were generated by the submerged welding process to perform a chemical, mineralogical and granulometric characterization of the same. The chemical characterization reveals that the main substances contained in the slag are Manganese, Aluminum, Silicon, Magnesium, Calcium, Iron and their respective oxides, already in the mineralogical characterization it was noticed the presence of four minerals being the Spinel, Forsterite, Hercynite and the Fluorite, besides that, granulometric characterization shows that a slag, when comminuted, presents particles with a average diameter of 0,068 mm, with a fineness modulus of 1,47 and a maximum characteristic dimension of 0,300 mm.

Key words: *submerged arc welding, slag, characterization.*

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CRONOLOGIA DA FORMAÇÃO DOS MÉTODOS DE SOLDAGEM.	17
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DA UNIÃO DE MATERIAIS.	18
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR PRESSÃO.	19
FIGURA 4 - ESQUEMA DE SOLDAGEM POR FUSÃO.	20
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO.	22
FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM AO ARCO SUBMERSO.	24
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DA SOLDAGEM AO ARCO SUBMERSO.	25
FIGURA 8 - EFEITO DA BASICIDADE EM RELAÇÃO AO TEOR DE OXIGÊNIO PRESENTE NO METAL DEPOSITADO.	28
FIGURA 9 - EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM AO ARCO SUBMERSO.	38
FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.	41
FIGURA 11 - CHAPA DE AÇO CARBONO APÓS DEPOSIÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA.	42
FIGURA 12 - ESCÓRIAS DE FLUXO DE SOLDAGEM.	43
FIGURA 13 - DIFRATOGRAMA DA AMOSTRA ANALISADA.	46
FIGURA 14 - RESULTADO DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA.	49

LISTA DE TABELA

TABELA 1 - TIPOS DE PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO	20
TABELA 2 - VANTAGENS, LIMITAÇÕES E APLICAÇÕES DA SOLDAGEM AO ARCO SUBMERSO.	24
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO TÍPICA DAS ESCÓRIAS GERADAS NA SOLDAGEM AO ARCO SUBMERSO.	29
TABELA 4 - RESULTADO DA LIXIVIAÇÃO DAS ESCÓRIAS.	31
TABELA 5 - RESULTADO DA SOLUBILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS.	32
TABELA 6 - QUANTIDADE GERADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS NO BRASIL EM T/ANO..	33
TABELA 7 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FLUXO UTILIZADO	36
TABELA 8 - PARÂMETROS UTILIZADOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM.	38
TABELA 9 - RESULTADO DA ANÁLISE QUALITATIVA DA AMOSTRA	44
TABELA 10 - RESULTADO QUALITATIVO EM RELAÇÃO AOS ÓXIDOS DA AMOSTRA ANALISADA..	45
TABELA 11 - RESULTADO DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA ANALISADA.	48
TABELA 12 - MÓDULO DE FINURA DA AMOSTRA ANALISADA.	50
TABELA 13 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA EM ÓXIDOS DO CIMENTO PORTLAND.	51

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AWS	American Welding Society
D₅₀	Valor do Diâmetro Médio
DMC	Dimensão Máxima Característica
DRX	Difração de Raios-X
FEAM-MG	Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais
FRX	Fluorescência de Raios-X
I.B.	Índice de Basicidade
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
M.F.	Módulo de Finura
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSI	Resíduos Sólidos Industriais
SAW	Soldagem ao Arco Submerso
Al	Alumínio
Ba	Bário
Ca	Cálcio
Cr	Cromo

F	Flúor
Fe	Ferro
K	Potássio
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
O	Oxigênio
Si	Silício
Sr	Estrôncio
Tb	Térbio
Ti	Titânio
Zn	Zinco
Zr	Zircônia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVO	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 HISTÓRICO DA SOLDAGEM.....	16
3.2 DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM	18
3.3 PROCESSOS DE SOLDAGEM	19
3.4. ARCO ELÉTRICO	21
3.4.1 CONCEITO	22
3.4.2 PROCESSOS AO ARCO ELÉTRICO	23
3.5 SOLDAGEM AO ARCO SUBMERSO.....	23
3.5.1 FLUXO DE SOLDAGEM	25
3.5.2 CLASSIFICAÇÃO DOS FLUXOS	26
3.6 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	29
3.6.1 CLASSIFICAÇÃO DA ESCÓRIA DO PROCESSO SAW	30
3.6.2 DESTINAÇÕES DAS ESCÓRIAS	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1 MATERIAIS	36
4.1.1 ARAME.....	36
4.1.2 FLUXO	36
4.1.3 CHAPA DE AÇO CARBONO	37
4.2 MÉTODOS.....	37
4.2.1 EQUIPAMENTOS	37

4.2.2 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	38
4.2.3 COMINUIÇÃO DAS ESCÓRIAS	39
4.3 CARACTERIZAÇÃO	39
4.3.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	39
4.3.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	39
4.3.3 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA	40
4.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 SOLDAGEM.....	42
5.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA.....	43
5.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	46
5.4 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	47
5.5 PROPOSTA DE REUTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA.....	50
6. CONCLUSÃO.....	52
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	53
ANEXO 1 – DIFRATOGRAMA DA AMOSTRA ANALISADA.....	58

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é considerada um dos mais importantes métodos de união permanente utilizados na indústria, podendo unir metais e polímeros, entre outros. Com a evolução da tecnologia, ao longo do século XX, novos processos de soldagem foram desenvolvidos, sendo, um destes, a soldagem ao arco submerso (SAW). (MARQUES *et al.*, 2011)

Atualmente a soldagem ao arco submerso é largamente utilizada na indústria metal mecânica na fabricação de navios, máquinas pesadas, estruturas e tubos, entre outros (VIANA *et al.*, 2008). Este processo produz, em grande volume, um subproduto mais conhecido como escória.

De acordo com a literatura, em 2002 foram gerados mais de seis mil toneladas de escória em nosso país. Após seis anos, a quantidade gerada deste subproduto aumentou para dez mil e quinhentas toneladas. Pela grande quantidade gerada e por apresentar um alto volume, a estocagem deste material se torna um problema. Além disso, este é classificado como um resíduo classe – II não inerte, de tal modo que o seu descarte deve ser controlado, gerando mais gastos para as indústrias. (DIAS *et al.*, 2004; VIANA *et al.*, 2006; VIANA, 2007)

Uma solução para este problema seria o reuso das escórias geradas, segundo Carter (1988) *apud* Viana (2007) este subproduto pode passar por diferentes processos e ser reutilizado como fluxo de soldagem. Já Groenner (2007) afirma que as escórias quando cominuídas podem ser utilizadas em até 10 % em massa como matéria prima na formulação de massa argilosa na confecção de cerâmica vermelha. Viana (2007) utiliza o mesmo material como substituinte total da areia na produção de argamassa de múltiplo uso. Por último Annoni (2011) demonstra que a partir da lixiviação de amostras da escória de soldagem ao arco submerso pode ser recuperado metais como o titânio. Desta forma nota-se a importância de caracterizar e apontar vias de reutilização das escórias geradas, sendo estes os principais focos do presente trabalho.

2 OBJETIVO

Caracterizar escórias produzidas na soldagem ao arco submerso empregando uma combinação de fluxo e arame amplamente utilizado nas indústrias e apresentar, a partir dos resultados, propostas de para reutilização.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Produzir escórias;
- Preparar amostras de escórias para sua respectiva caracterização;
- Realizar análises das escórias por difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX) e peneiramento mecânico;
- Propor uma via de reutilização destas escórias.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 HISTÓRICO DA SOLDAGEM

A soldagem é, atualmente, um dos processos mais utilizados na indústria metal mecânica. Porém, esta arte de unir dois ou mais materiais pode ser datada desde os tempos mais remotos. (MARQUES *et al.*, 2011).

Vários artefatos foram confeccionados pelo método de brasagem, sendo este, descoberto a mais de 4000 anos. Além disso, a soldagem por forjamento foi muito utilizada há mais de 3000 anos. Um exemplo disso é que no Museu de Louvre, na França, existe um pingente de ouro soldado que foi produzido na Pérsia a 4000 a.C.. A soldagem, na Antiguidade e na Idade Média, foi muito utilizada como processo de fabricação de armas e instrumentos cortantes. Estas ferramentas eram fabricadas utilizando ferro e tiras de aço soldadas nas posições de corte. (MARQUES *et al.*, 2011).

A soldagem começou a progredir logo após os experimentos de Humphrey Davy, que no início do século XIX, gerou um arco elétrico em condições controladas. Além disso, houve o descobrimento do acetileno por Edmund Davy e da criação de fontes produtoras de energia elétrica, que permitiram o desenvolvimento da soldagem por fusão. Em um segundo momento, após a Segunda Guerra Mundial, os processos de soldagem tiveram uma enorme evolução devido aos grandes avanços tecnológicos, atingindo aos atuais processos de fabricação por meio da soldagem. (MARQUES *et al.*, 2011).

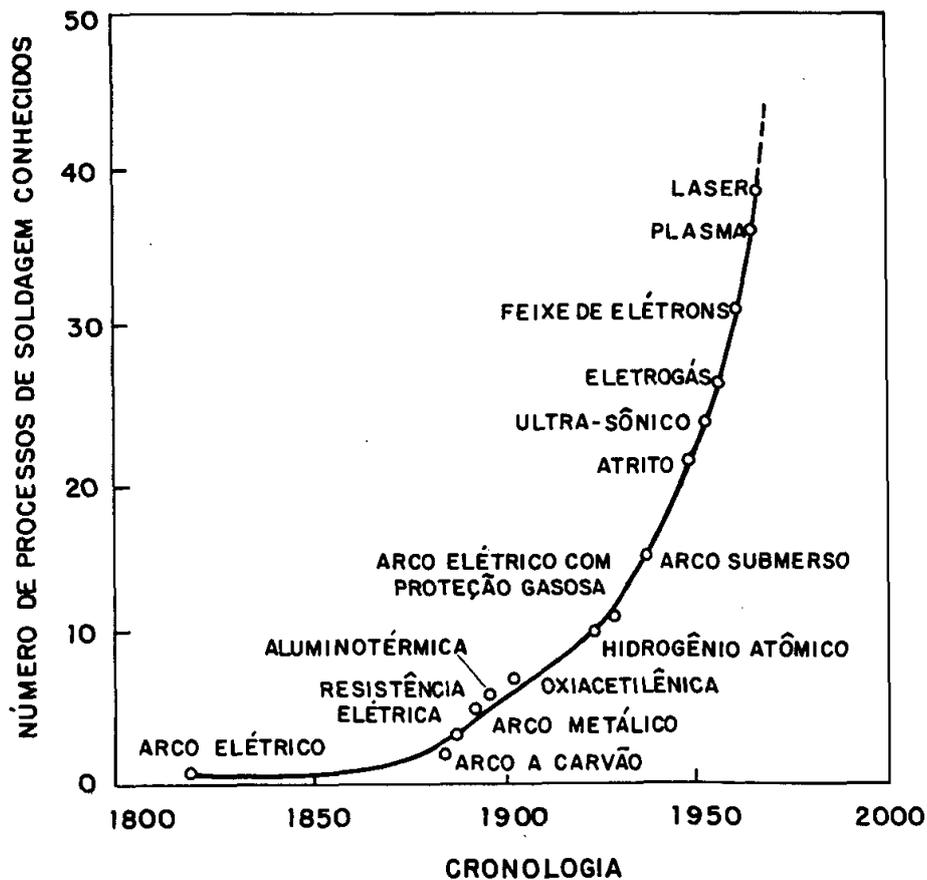
De acordo com Okumura e Taniguchi (1982), somente após a descoberta da energia elétrica é que a soldagem obteve um grande avanço. A evolução desse processo segue a seguinte cronologia:

- **1885** – o arco elétrico foi utilizado pela primeira vez na soldagem por Bernardos, utilizando um eletrodo de grafita;
- **1892** – Slavianoff, pela primeira vez na história, utilizou um eletrodo metálico no processo de soldagem;
- **1895** – Goldschmitt desenvolveu a soldagem aluminotérmica;
- **1896** – Thompsom inventou o processo de soldagem por resistência elétrica;

- **1889** – Zerner, utilizando o princípio do arco elétrico, desenvolveu um método para fundir metal-base;
- **1901** – Fouché e Piccar utilizaram a chama oxiacetilênica na união de materiais metálicos.

Após um grande intervalo de tempo, entre os períodos da Primeira Guerra e da Segunda Guerra Mundial, com o grande progresso da ciência e da tecnologia desenvolvida naquela época, os processos de soldagem obtiveram um grande avanço, possibilitando a criação de novos processos, chegando até ao cenário atual. É representado na Figura 1 representa a cronologia da invenção destes, o ano em que foram desenvolvidos e a quantidade de processos de soldagem existentes. (WAINER *et al.*, 1992).

Figura 1 - Cronologia da formação dos métodos de soldagem.



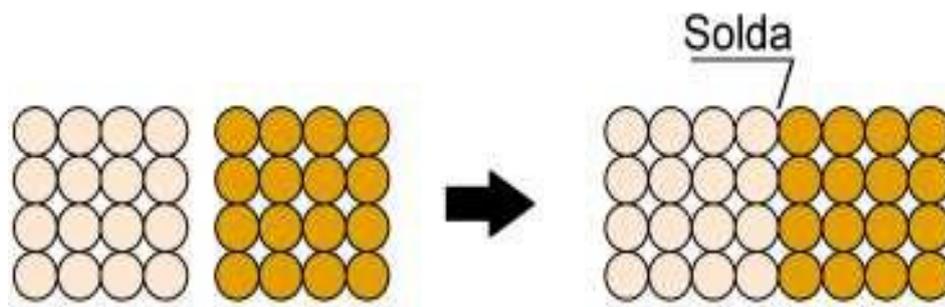
Fonte: WAINER *et al.*, 1992.

3.2 DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM

De acordo com Marques *et al.* (2011), os métodos de união entre materiais podem ser classificados em dois grupos. No primeiro, a união é baseada na ação de forças macroscópicas. Já no segundo, a união é baseada em forças microscópicas, ou seja, em forças interatômicas e intermoleculares.

A soldagem é um processo baseado no segundo grupo, que pode ser representada pelo o esquema da Figura 2, sendo um dos processos mais importantes de união de materiais utilizados na indústria. (MODENESI *et al.*, 2012).

Figura 2 - Representação da união de materiais.



Fonte: MODENESI *et al.*, 2012.

Desse modo, a literatura apresenta algumas definições para a soldagem. Porém, algumas são equivocadas, pois consideram que esse processo ocorre apenas em materiais metálicos. No entanto, existem processos de soldagem para outros tipos de materiais, como polímeros. (MARQUES *et al.*, 2011)

Segundo a *American Welding Society* (AWS) a definição de processo de soldagem pode ser dada por: “Processo de união de materiais, usado para obter a coalescência localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem utilização de pressão e/ou material de adição”. (MATTEI, 2011).

Contudo, a definição dada pela AWS não é a mais apropriada, pois não engloba o processo de brasagem. Então, pode-se dizer que a definição mais completa é: “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza

similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos”. (MARQUES *et al.*, 2011, p. 22).

3.3 PROCESSOS DE SOLDAGEM

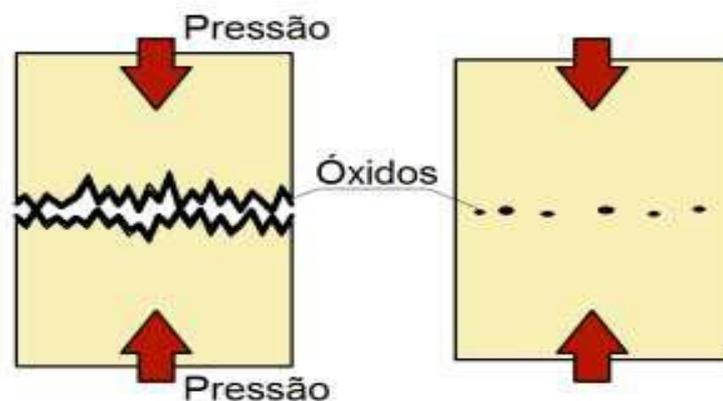
No geral, os processos de soldagem podem empregar tanto pressão quanto calor, envolvendo ou não a fusão dos materiais. (MARQUES *et al.*, 2011).

A soldagem por pressão, segundo Machado (1996), pode ser dividida em à quente ou à frio. Na primeira, as peças a serem soldadas são mantidas sob uma carga e aquecidas em temperaturas inferiores a linha *solidus* dos materiais. Na segunda, a solda é realizada através da pressão em temperatura ambiente.

Já para Modenesi *et al.* (2012) a soldagem por pressão consiste por uma união que é obtida pela deformação do material confinado, preferencialmente, em uma região restrita às vizinhanças da junta. Desta forma, em vários desses processos, essa região é aquecida em relação ao restante da peça. Conforme os autores, neste grupo destacam-se a soldagem por resistência e a soldagem por fricção devido aos seus avanços tecnológicos e sua importância na indústria.

É representado na Figura 3 um esquema da formação da solda em processos de soldagem por pressão.

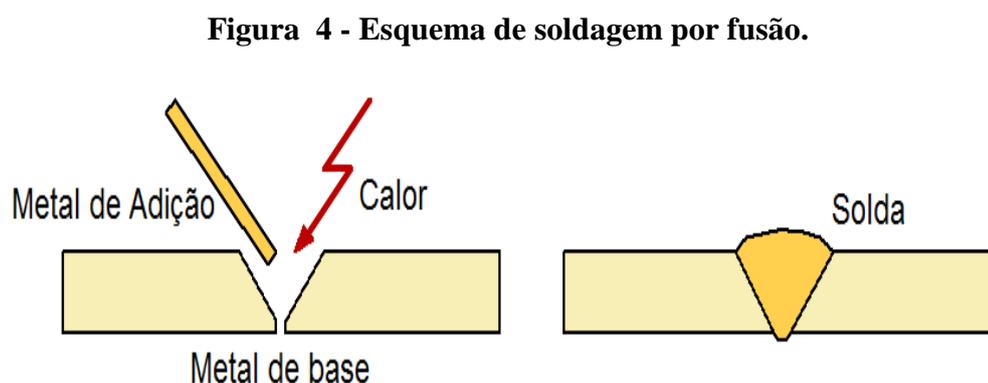
Figura 3 - Representação do processo de soldagem por pressão.



Fonte: MODENESI *et al.*, 2012.

Na soldagem por fusão a peças são aquecidas e consequentemente unidas através de uma fonte de energia, com ou sem aplicação de pressão. (MODENESI *et al.*, 2012).

Na Figura 4 pode ser visto um desenho esquemático da soldagem por fusão.



Fonte: MODENESI *et al.*, 2012.

Essa divisão tem a finalidade de facilitar o seu entendimento e distinguir os tipos de processos de acordo com o tipo de fonte de energia utilizado para unir as peças. É exibido na Tabela 1 alguns tipos de processo de soldagem por fusão, de acordo com sua respectiva fonte de calor.

Tabela 1 – Tipos de processos de soldagem por fusão. (continua)

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE
Soldagem por eletro-escória.	Aquecimento por resistência da escória líquida.	Contínua ou alternada.	Escória.
Soldagem ao Arco Submerso.	Arco elétrico.	Contínua ou alternada. Eletrodo +.	Escória e gases gerados.
Soldagem com Eletrodos Revestidos.	Arco elétrico.	Contínua ou alternada. Eletrodo + ou -.	Escória e gases gerados.

Tabela 1 – Tipos de processos de soldagem por fusão. (continuação)

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE
Soldagem com Arame Tubular.	Arco elétrico.	Contínua. Eletrodo +.	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o CO ₂ .
Soldagem MIG/MAG.	Arco elétrico.	Contínua. Eletrodo +.	Argônio ou Hélio, Argônio + O ₂ , Argônio+ CO ₂ , CO ₂ .
Soldagem a Plasma.	Arco elétrico.	Contínua. Eletrodo -.	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio.
Soldagem TIG.	Arco elétrico.	Contínua ou alternada. Eletrodo -.	Argônio, Hélio ou misturas destes.
Soldagem por Feixe Eletrônico.	Feixe eletrônico.	Contínua ou alternada. Eletrodo -.	Vácuo (> 10 – 4 mm Hg).
Soldagem a Laser.	Feixe de luz.		Argônio ou Hélio.
Soldagem a Gás.	Chama oxiacetilênica.		Gás (CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O).

Fonte: MODESENI *et al.*, 2012, p. 9. (Adaptado).

3.4. ARCO ELÉTRICO

Por meio da Tabela 1, destaca-se que o arco elétrico é a fonte de energia mais utilizada dentre os processos de soldagem por fusão, pois, segundo Modenesi (2012) este apresenta uma ótima combinação de características, a saber:

- Adequada concentração de energia no processo de fusão localizada;
- Processo de fácil controle;
- Baixo custo em relação aos outros processos;

- Baixo nível de riscos aos operadores.

3.4.1 CONCEITO

O arco elétrico pode ser definido como “descarga elétrica mantida através de um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos do eletrodo negativo (catodo) aquecido e mantido pela ionização térmica do gás aquecido”. (WAINER *et al.*, 1992, p. 20).

Segundo Marques *et al.* (2011), o arco elétrico é uma descarga elétrica que é mantida a partir de um gás ionizado em altas temperaturas, sendo mais conhecido como plasma. Já para Machado (1996), o arco elétrico é caracterizado como uma descarga que ocorre entre dois eletrodos envolvidos por um gás ou vapor metálico. Este fenômeno é representado pela a Figura 5.

Figura 5 - Representação do arco elétrico.



Fonte: MODENESI , 2012.

3.4.2 PROCESSOS AO ARCO ELÉTRICO

Segundo Modenesi e Marques (2011), a soldagem ao arco elétrico envolve um grande número de processos, sendo que os mais utilizados pela indústria utilizam esse tipo de fonte de energia. Desse modo, podemos citar exemplos de processos de soldagem que utilizam o arco elétrico. São eles:

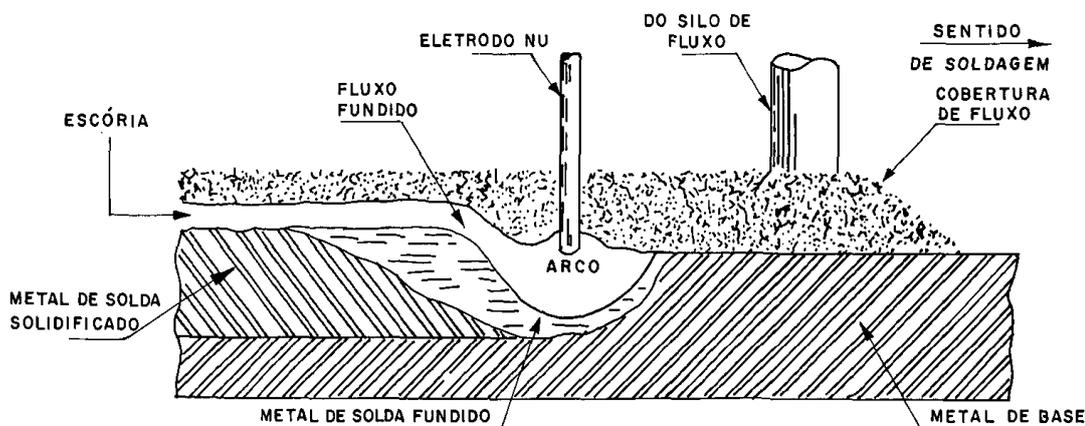
- Soldagem com eletrodos revestidos;
- Soldagem a arco gás-tungstênio;
- Soldagem a arco gás-metal;
- Soldagem com arame tubular;
- Soldagem a plasma;
- Soldagem ao arco submerso.

3.5 SOLDAGEM AO ARCO SUBMERSO

A Soldagem ao Arco Submerso ou *Submerged Arc Welding* (SAW) é um processo de soldagem à fusão que utiliza o arco elétrico como sua fonte de calor. O processo consiste na união entre dois materiais, onde ocorre um aquecimento entre eles e conseqüentemente a fusão devido a presença do arco elétrico, que é estabelecido entre um eletrodo e a peça a ser soldada. Uma particularidade desse processo é que o arco é totalmente submerso por um material granulado e fusível, chamado de fluxo. (MARQUES *et al.*, 2011).

Segundo Wainer *et al.* (1992) e Machado (1996), o fluxo age como um material fundente tendo como sua principal função a de proteger o cordão de solda de quaisquer contaminações provenientes da atmosfera. Além disso, esse material possibilita a retirada de impurezas e da desoxidação do metal fundido e permite, também, a adição de elementos de liga. A Figura 6 representa um esquema do processo de soldagem ao arco submerso.

Figura 6 - Representação do processo de soldagem ao arco submerso.



Fonte: WAINER *et al.*, 1992.

Conforme Wainer *et al.* (1992) e Machado (1996), a operação de soldagem ao arco submerso é mecanizada e, em raríssimos casos, ela pode ser semi-mecanizada, isto é, o operador movimenta as partes móveis da máquina. Desta forma, este processo possui alta eficiência, não sendo necessário um treinamento especializado para o operador. De acordo com a Tabela 2 as vantagens, as limitações e as aplicações desse processo são:

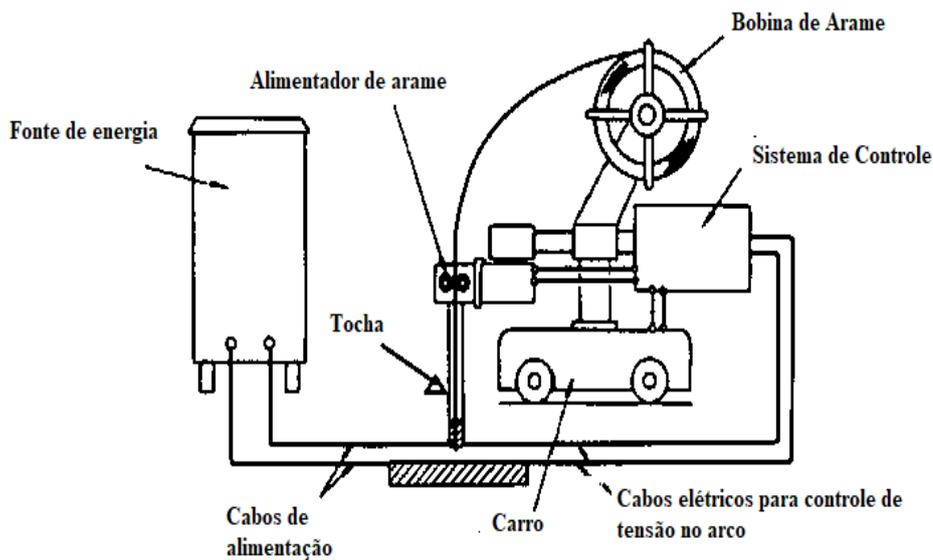
Tabela 2 – Vantagens, limitações e aplicações da soldagem ao arco submerso.

Vantagens e Limitações	Aplicações
Altas velocidades de soldagem e taxas de deposição.	Soldagem de aços carbono e ligados.
Produz soldas uniformes e de bom acabamento superficial.	Soldagem de níquel e suas ligas.
Ausência de respingos e fumos.	Soldagem de membros estruturais e tubos de grande diâmetro.
Dispensa proteção contra radiação devido ao arco não visível.	Soldagem em fabricação de peças pesadas de aço.
Facilmente mecanizado.	Recobrimento, manutenção e reparo.
Elevada Produtividade	

Fonte: MODENESI; MARQUES, 2011, p. 23. (Adaptado).

De acordo com Marques *et al.* (2011), os equipamentos básicos para a realização da soldagem ao arco submerso são ilustrados na Figura 7,

Figura 7 - Representação dos equipamentos da soldagem ao arco submerso.



Fonte: OKUMURA E TANIGUCHI, 1982. (Adaptado).

3.5.1 FLUXO DE SOLDAGEM

De acordo com Marques *et al.* (2011), os fluxos são materiais granulares compostos por vários óxidos e minerais, que podem conter algum tipo de ferro-liga. Segundo Fortes e Araújo (2004), esse material possui diversas funções dentro do processo de soldagem ao arco submerso. O fluxo cobre totalmente o arco elétrico, dando a garantia de proteção, evitando contaminações de impurezas e conservando a geometria do cordão de solda. Além disso, conforme Marques *et al.* (2011), durante a solda, o fluxo é fundido formando a escória que é um subproduto deste processo. Devido suas características físicas e químicas, o subproduto influencia o aspecto e o formato do cordão de solda.

3.5.2 CLASSIFICAÇÃO DOS FLUXOS

Segundo Ogborn (1993), os fluxos de soldagem ao arco submerso podem ser classificados de acordo com o seu processo de fabricação, de acordo com o efeito sobre o teor de liga depositada no cordão de solda e em relação ao índice de basicidade.

De acordo com os processos de fabricação, os fluxos de soldagem podem ser divididos em dois grupos: os fundidos e os aglomerados. (MARQUES *et al.*, 2011).

- Fluxos Fundidos: são obtidos através da fusão dos seus componentes, seguido de resfriamento em água ou em coquilha, resultando em um produto de aparência cristalina. No final, o material passa pelo processo de secagem e quando necessário por britagem, moagem e peneiramento. Esse fluxo possui uma ótima homogeneidade química, além de não ser higroscópicos, ou seja, não absorvem umidade do ambiente que simplifica sua estocagem, porém apresenta dificuldade de adicionar desoxidantes e ferro liga durante a fabricação;
- Fluxos Aglomerados: em sua fabricação seus ingredientes são pulverizados e misturados a seco, sendo aglomerados com silicato de potássio, sódio ou por uma mistura de ambos. Após esse procedimento, a mistura agora úmida é pelletizada e aquecidas em temperaturas entre 600°C e 900°C, sendo moída e peneirada no final. Esse fluxo é higroscópico e permite a fácil adição de desoxidantes e elementos de liga.

Os fluxos são classificados com relação a sua influência sobre os elementos de liga no metal de solda. (OGBORN, 1993).

- Fluxo Neutro: são fluxos que não produzem alterações significativas na composição química do metal de solda. Há apenas compensação de silício e manganês;
- Fluxo Ativo: são fluxos que contêm quantidades controladas de silício e/ou manganês. Estes metais são adicionados nos fluxos de modo aumentar a resistência à porosidade e à trincas;
- Fluxo Ligado: são fluxos que têm grande quantidade de elementos de liga como o silício, manganês, cromo, níquel, cobre e molibdênio.

Os fluxos também são classificados de acordo com o índice de basicidade (I.B.). Segundo Modenesi *et al.* (2012) este índice é calculado pela Equação 1:

$$B = \frac{CaO + MgO + Na_2O + K_2O + CaF_2 + \frac{1}{2}(MnO + FeO)}{SiO_2 + \frac{1}{2}(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} \quad (1)$$

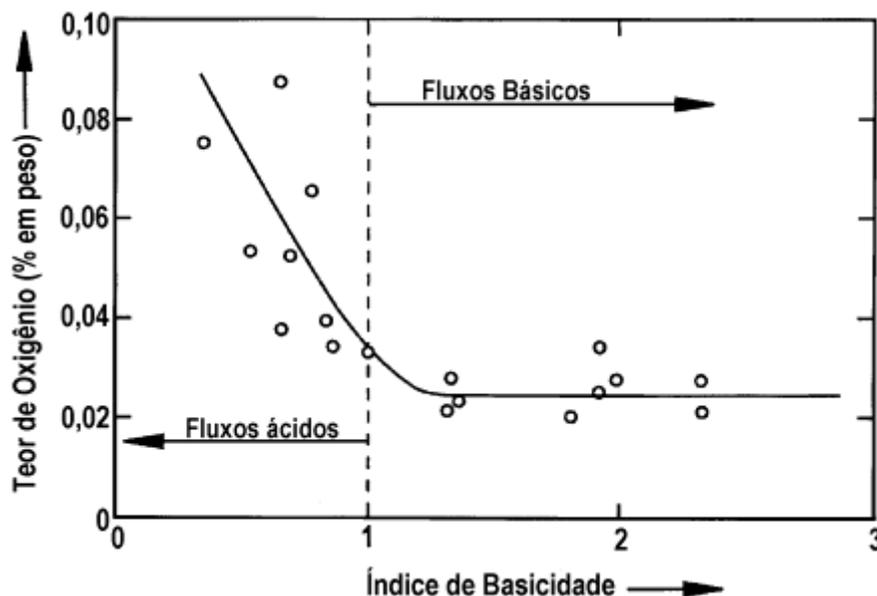
Onde:

- IB < 1: Fluxos Ácidos;
- 1 < IB < 1,5: Fluxos Semi-Básicos;
- IB > 1,5: Fluxos Básicos

Em geral, os fluxos básicos asseguram menores teores de oxigênio, enxofre e fósforo no metal depositado, proporcionando melhores propriedades mecânicas e maior resistência à fissuração durante a solidificação, porém, estes fluxos apresentam menor estabilidade operacional e destacabilidade da escória. Já os fluxos ácidos tendem a ter um metal de solda com altos teores de oxigênio, enxofre e fósforo. (MODENESI *et al.*, 2012).

A Figura 8 exhibe o efeito da basicidade no teor de oxigênio no metal depositado.

Figura 8 - Efeito da basicidade em relação ao teor de oxigênio presente no metal depositado.



Fonte: Modenesi *et al.*, 2012.

Desta forma, segundo Fortes e Araújo (2004), os fatores que influenciam na escolha do fluxo são as características de desempenho e suas propriedades mecânicas. As características de desempenho são a facilidade de remoção da escória produzida, remoção dos óxidos, capacidade da condução de corrente elétrica e da possibilidade do uso de corrente alternada. Já as propriedades mecânicas são aquelas de importância primária em aplicações críticas como vasos de pressão e serviços a baixa temperatura. Desse modo, essa escolha deve respeitar as características de desempenho e cumprir todas as propriedades mecânicas necessárias.

3.5.3 ESCÓRIAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM AO ARCO SUBMERSO

As escórias geradas na soldagem ao arco submerso são consideradas como um resíduo sólido industrial do processo. Segundo Annoni (2011), elas também podem ser classificadas, de acordo com o tipo de fluxo utilizado no processo de soldagem. Desta forma, as escórias podem ser do tipo ácida, neutra ou básica. A Tabela 3 mostra a composição típica dos três tipos de escória.

Tabela 3 – Composição típica das escórias geradas na soldagem ao arco submerso.

Constituintes (%)		Escória Neutra		Escória Ácida		Escória Básica	
Al₂O₃	Al	27,61	14,62	34,10	18,21	13,87	7,34
	CaO	19,58		15,07		42,13	
	SiO₂	15,12		18,71		14,36	
	MgO	14,70		-		23,77	
	MnO	9,11		13,48		1,42	
	ZrO₂	4,46		0,31		0,01	
	Fe₂O₃	3,56		5,66		1,16	
	P₂O₅	2,87		-		-	
Constituintes (%)		Escória Neutra		Escória Ácida		Escória Básica	
TiO₂	Ti	1,09	0,94	9,60	8,30	0,12	0,10
	K₂O	0,41		0,84		2,33	
	HfO₂	0,20		-		-	
	SrO	0,02		0,02		-	
	V₂O₅	-		0,50		-	
	NbO	-		0,04		-	
	Outros	1,28		1,67		0,84	

Fonte: VIANA *et al.*, 2006 *apud* ANNONI, 2011, p. 14. (Adaptado).

Conforme Viana (2007), as escórias geradas na soldagem ao arco submerso são usualmente descartadas em aterros sanitários. Desta forma, existem estudos que buscam alternativas para o reaproveitamento desse resíduo sólido.

3.6 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Em concordância com a ABNT NBR 10004:2004, pode-se dizer que a definição de resíduos sólidos é:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em

equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT, 2004).

Para realizar a classificação dos resíduos deve-se conhecer a origem do resíduo, de qual processo ele foi originado, suas características e da comparação de seus constituintes. Desta forma, os resíduos podem ser classificados, conforme a ABNT NBR 10004:2004 em:

- Resíduos Classe I - Perigosos: resíduos que apresentam quaisquer periculosidade, patogenicidade, toxicidade, reatividade, corrosividade, inflamabilidade, ou que constem nos anexos A ou B da ABNT NBR 10004:2004;
- Resíduos Classe II – Não Perigosos: Conforme a norma, esta classe é dividida em:
 - Resíduos Classe II A – Não Inertes: são todos aqueles em que não são enquadrados como resíduos classe I ou como resíduos classe II B. Os resíduos desta classe apresenta alguma propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
 - Resíduos Classe II B – Inertes: são quaisquer resíduos que, quando amostrados por uma forma representativa, de acordo com a ABNT NBR 10007:2004, e quando são submetidos a um contato dinâmico e estático em água destilada ou desionizada, em temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006:2004, não tiverem nenhum dos seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, salvo aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, consonante ao anexo G da ABNT NBR 10004:2004.

3.6.1 CLASSIFICAÇÃO DA ESCÓRIA DO PROCESSO SAW

Para obter a classificação das escórias geradas no processo de soldagem ao arco submerso é necessário que seja realizado ensaio de lixiviação de acordo com a ABNT NBR 10005:2004, que tem o objetivo de obter um extrato lixiviado dos resíduos para classificá-los. Além disso, é necessária a solubilização do mesmo, conforme a ABNT NBR 10006:2004, que

visa à obtenção de um extrato solubilizado de resíduos sólidos, podendo assim diferenciar e classificar conforme a ABNT NBR 10004:2004.

Viana (2007), em sua tese, realizou ensaios de lixiviação e solubilização das escórias, conforme as normas citadas anteriormente. Desse modo, a autora obteve a caracterização ambiental dos resíduos e pode concluir que as escórias geradas na soldagem ao arco submerso não apresentam quaisquer tipo de periculosidade, patogenicidade, toxicidade, reatividade, corrosividade, inflamabilidade ou outras que constam nos anexos A e B da ABNT NBR 10004:2004.

Na Tabela 4 podemos observar que o extrato lixiviado, conforme Viana (2007), não contém poluentes em concentração superiores aos valores determinados pela ABNT NBR 10004:2004.

Tabela 4 – Resultado da lixiviação das escórias.

Poluente	Resultado do extrato lixiviado (mg/L)	Limite máximo no lixiviado (mg/L) segundo NBR 10004 (2004)
Arsênio	N.D.	5,0
Bário	N.D.	100,0
Cádmio	N.D.	0,5
Chumbo	N.D.	5,0
Cromo Total	0,08	5,0
Fluoreto	N.D.	150,0
Mercúrio	< 0,0001	0,1
Prata	N.D.	5,0
Selênio	N.D.	1,0

Fonte: VIANA, 2007, p. 73. (Adaptado).

N.D. = Não detectado

Já no ensaio de solubilização, referente aos resíduos não perigosos, em função da potabilidade da água e da concentração solubilizada de constituintes do resíduo, Viana (2007) demonstrou que a escória é um resíduo classe II A não inerte. Isso pode ser observado na

Tabela 5, pois os teores de cromo total e de alumínio são superiores ao limite máximo determinado pela ABNT NBR 10004:2004.

Tabela 5 – Resultado da solubilização das escórias.

Poluente	Resultado do extrato solubilizado (mg/L)	Limite máximo no extrato (mg/L) segundo a NBR 10004 (2004)
Arsênio	N.D.	0,05
Bário	N.D.	1,00
Cádmio	N.D.	0,005
Cianeto	N.D.	0,05
Chumbo	N.D.	0,10
Cromo Total	0,08	0,05
Fenol	N.D.	0,001
Fluoreto	N.D.	1,50
Mercúrio	< 0,0001	0,001
Nitrato (mg N/L)	N.D.	10,0
Prata	N.D.	0,05
Selênio	N.D.	0,01
Alumínio	1,8	0,2
Cloreto	37,0	250
Cobre	N.D.	1,00
Dureza (mgCaCO ₃ /L)	44,0	500,0
Ferro	0,28	0,30
Manganês	0,04	0,10
Sódio	161,0	200,0
Sulfato (mg SO ₄ /L)	< 1,0	400,0
Zinco	N.D.	5,00

Fonte: VIANA, 2007, p. 74. (Adaptado).

N.D. = Não detectado

3.6.2 DESTINAÇÕES DAS ESCÓRIAS

Em 2010 foi promulgada no Brasil país a Lei nº 12.305/2010, lei que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Ela inicia uma grande meta, que é a regulação ambiental estabelecendo princípios, objetivos, diretrizes, instrumentos, ações e metas. Desse modo, esta lei visa o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos gerados, sejam eles urbanos ou industriais. Segundo o IPEA (2012), em relação aos resíduos sólidos industriais (RSI) a PNRS prevê uma série de obrigações aos setores produtivos. Estas obrigações visam os benefícios ambientais e da destinação adequada dos RSI. Sendo assim, a Lei nº 12.305/2010 obriga que as indústrias optem pela redução, o reuso e pela reciclagem dos resíduos gerados.

A Tabela 6 mostra a quantidade gerada de resíduos sólidos industriais em toneladas por ano (t/ano) no Brasil, evidenciando a necessidade da PNRS em relação à destinação dos mesmos.

Tabela 6 – Quantidade gerada de resíduos sólidos industriais no Brasil em t/ano.

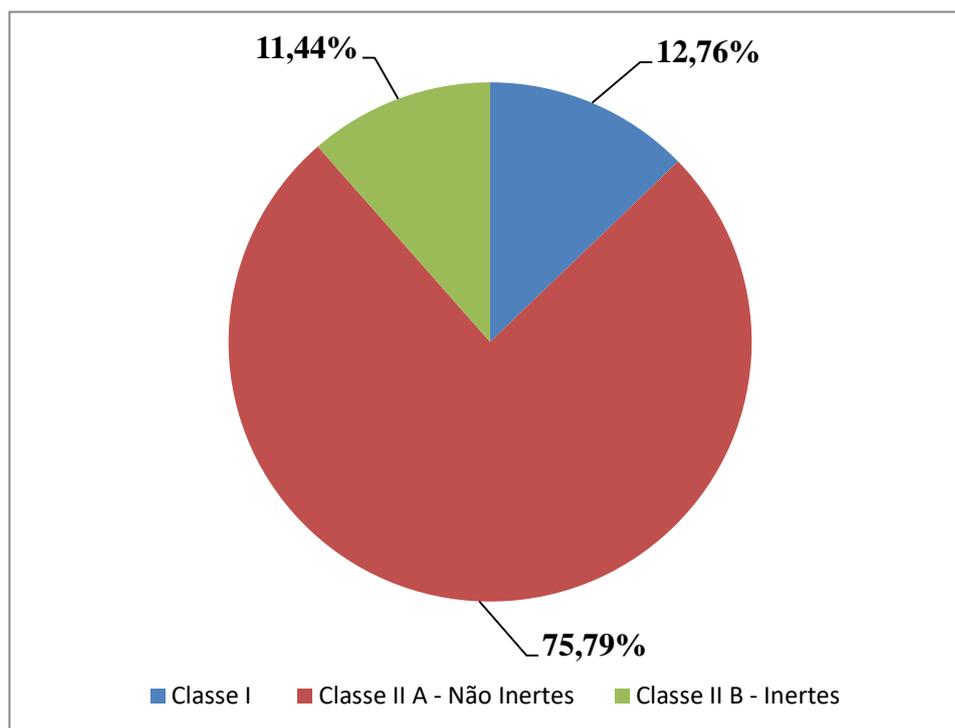
UF	PERIGOSOS	NÃO PERIGOSOS	TOTAL
AC	5.500	112.765	118.265
AP	14.341	73.211	87.552
CE	115.238	393.831	509.069
GO	1.044.947	12.657.326	13.702.273
MT	46.298	3.448.856	3.495.154
MG*	828.183	14.337.011	15.165.194
PB	657	6.128.750	6.129.407
PE	81.583	7.267.930	7.349.513
PR	634.543	15.106.393	15.740.936
RN	3.363	1.543.450	1.546.813
RS	182.170	946.900	1.129.070
RJ	293.953	5.768.562	6.062.515
SP	535.615	26.084.062	26.619.677
TOTAL	3.786.391	93.869.046	97.655.438

Fonte: IPEA, 2012, p. 28. (Adaptado).

*Dados de 2010.

A Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM-MG), através do seu estudo, mostra que o total de resíduos sólidos industriais gerados em 2015 foi de 58.964.261,18 toneladas, sendo que 87,23% do total são resíduos de classe II – não perigosos. O Gráfico 1 mostra a divisão dos RSI produzidos em Minas Gerais.

Gráfico 1 – Porcentagem de resíduos gerados em Minas Gerais em relação a sua classe.



Fonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (2016).

Como mostrado pelos dados anteriores, observa-se a necessidade de encontrar possíveis destinações para as escórias geradas na soldagem ao arco submerso. Usualmente estas escórias são descartadas em aterros sanitários específicos para este tipo de resíduo, porém alguns estudos mostram que estas podem ser reutilizadas.

Segundo Carter (1988) *apud* Viana (2007) as escórias geradas no final da soldagem ao arco submerso, após passar pelos processos de esmagamento e peneiramento, deixando-as no mesmo tamanho do fluxo original, podem ser reutilizadas dentro do próprio processo. Porém, o trabalho evidencia que novos estudos devem ser feitos para confirmar esta análise.

Já Dias *et al* (2004) *apud* Viana (2007) *apud* Junior (2014), devido a grande preocupação com os danos ambientais gerados pelas escórias, utilizaram este resíduo como agregado para a produção de concreto. A partir do estudo obtiveram os seguintes resultados:

- As escórias quando utilizadas como agregado graúdo influencia positivamente em relação à trabalhabilidade e negativamente em relação às resistências mecânicas necessárias para o concreto;
- Devido ao formato do resíduo, ele pode ser utilizado como agregado miúdo. Sendo que o mesmo não interfere na trabalhabilidade e nas resistências necessárias;
- Na produção de concreto utilizado na infraestrutura urbana, a escória pode ser utilizada como substituto de agregado miúdo e graúdo, pois neste caso não necessário uma alta resistência mecânica.

Groenner (2007) em sua tese mostra que resíduos gerados podem ser utilizados em até 10% em peso de resíduo como matéria prima na formulação de massa argilosa para confecção de cerâmicas vermelhas, já que atendem as especificações técnicas e ambientais previstas.

Viana (2007) em seu trabalho utiliza as ESAS como agregado miúdo na produção de argamassa de múltiplo. Os resíduos passam por diversos processos de moagem para atingir o tamanho necessário de modo ser considerado como agregado miúdo. Ela evidencia que não há perdas das propriedades características das argamassas, pois estas argamassas atendem todos os limites exigidos pela ABNT NBR 13281:2005. Desse modo, a autora conclui que as escórias geradas no processo de soldagem ao arco submerso quando cominuídas, e respeitando as regras da ABNT, podem substituir totalmente a areia como agregado miúdo.

Já Annoni (2011) mostra que a lixiviação para a obtenção de metais como alumínio e o titânio é possível, porém é difícil de ser executada. A autora cita que novos estudos devem ser realizados de maneira encontrar novas rotas de obtenção desses metais.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 ARAME

O material utilizado foi o arame OK AUTROD 12.20 (classificação EM 12K) da marca ESAB, com diâmetro de 2,4 mm. Segundo sua Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISP), o produto é composto por um arame maciço do tipo aço carbono e cobreado. Em sua composição química, além do ferro, encontram-se carbono, silício, manganês, cromo, níquel e outros residuais, segundo especificado para esta classe de consumível.

4.1.2 FLUXO

Foi utilizado o fluxo OK FLUX 429 da marca EASB, formando um par fluxo/arame que é constantemente utilizado nas indústrias. Segundo o catálogo de consumíveis da empresa, o material é um fluxo aglomerado neutro, semibásico, designado para soldas de único passe em chapas de aço carbono e baixa liga, tendo um tamanho e distribuição das partículas em um intervalo de 0,075 mm a 1,18 mm (14x200 Tyler). De acordo com sua ficha de segurança, o fluxo é um aglomerado de minerais calcinados e sua composição química aproximada é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição química do fluxo utilizado. (continua)

Constituinte	Concentração aproximada (%)
Óxido de Alumínio	20 a 30
Óxido de Magnésio	20 a 30
Manganês	10 a 15
Quartzo	10 a 15
Silicatos	5 a 10

Tabela 7 - Composição química do fluxo utilizado. (continuação)

Constituinte	Concentração aproximada (%)
Fluoretos	5 a 10
Ferro	2 a 5
Óxido de Manganês	2 a 5
Silício	2 a 5
Óxido de Titânio	< 1

Fonte: Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos – OK FLUX 429, ESAB, 2017.

4.1.3 CHAPA DE AÇO CARBONO

Foi utilizada uma chapa de aço carbono ASTM A36, que passou pelo processo de jateamento para retiradas de partes oxidadas. Desta forma, os cordões de solda foram depositados na mesma.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 EQUIPAMENTOS

A soldagem ao arco submerso foi executada com o uso do conjunto modelo AS-800, da White Martins S.A., constituído por uma fonte de energia do tipo V-800, uma unidade de controle do modelo Unionmelt CAS-100 com um carro propulsor e cabeçote de solda conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Equipamento de soldagem ao arco submerso



Fonte: Próprio autor.

4.2.2 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Durante todo o processo de soldagem foram utilizados os mesmos parâmetros. Certificando que não exista diferença no momento da coleta das escórias da soldagem ao arco submerso, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros utilizados no processo de soldagem.

Parâmetros	
Corrente	400 A
Tensão	32 V
Velocidade de Soldagem	30 cm/min
Distância do Bico à Chapa	30 mm

Fonte: Próprio autor.

A definição destes parâmetros foi realizada considerando:

- Valores recomendados pelo fabricante dos consumíveis em seu catálogo técnico; (ESAB, 2004)
- Valores que possibilitaram a obtenção de cordões com aspecto visual satisfatório.

4.2.3 COMINUIÇÃO DAS ESCÓRIAS

O material foi cominuído pelo processo de moagem por moinho de bolas pelo equipamento Moinho de Bolas SL – 34/E produzido pela SOLAB. Foram utilizadas bolas de aço cromo, durante quarenta minutos, tempo necessário para obter uma cominuição homogênea do material, transformando-o em pó.

4.3 CARACTERIZAÇÃO

4.3.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A caracterização química da escória cominuída foi realizada através da técnica de espectroscopia por fluorescência de raios-X (FRX), pelo equipamento Ray Ny EDX 720 da Shimadzu, em uma atmosfera à vácuo.

4.3.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Para identificar os possíveis compostos presentes na escória cominuída, foi realizado o ensaio de Difração de Raios-X (DRX), através do equipamento Difrátômetro de Raios-X da Shimadzu XDR-7000, com radiação de operação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), corrente de 30 mA, tensão de 40 kV, ângulo 2θ percorrido de 10 a 80° , com passos de $0,02^\circ$ a cada 0,6 s.

4.3.3 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica da escória cominuída foi realizada via peneiramento à seco, utilizando uma série de peneiras, da marca Bertel, dispostas em ordem decrescente em relação às suas aberturas em mm, são elas: 0,425; 0,300; 0,150; 0,075 e 0,045. Desse modo, a peneira de maior abertura será a primeira e conseqüentemente a de menor abertura será a última, sendo que após essa sequencia é colocado um recipiente, denominado fundo, para coletar o material passante da última peneira.

Inicialmente toda a amostra foi passada em uma peneira de abertura de 0,600 mm para retirada de material que não foi totalmente cominuído. Após essa primeira etapa e com o auxílio de um agitador eletromagnético da marca Bertel, as amostras foram agitadas e peneiradas por um tempo de dez minutos com suas vibrações na intensidade nove. Desta forma, foi peneirada uma amostra de 125 g.

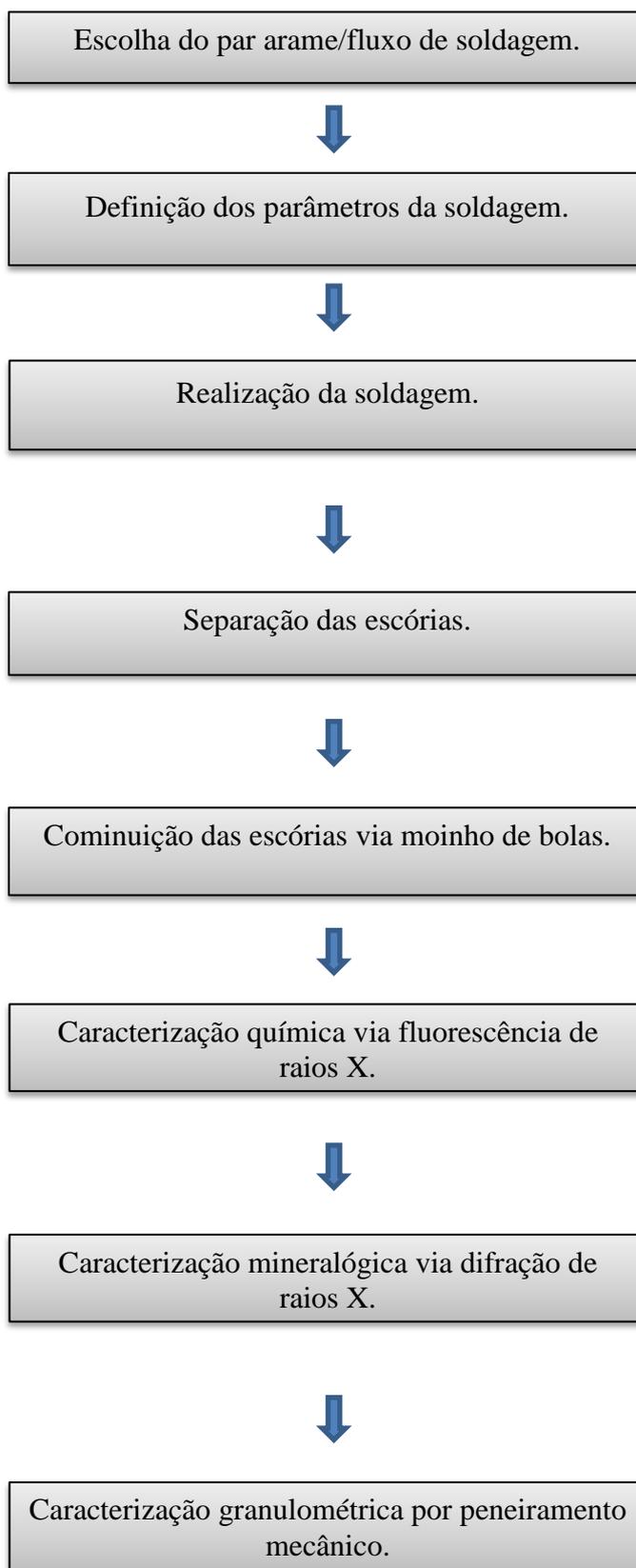
4.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para a realização dos experimentos deste trabalho primeiro foi necessário fazer a seleção do par arame e fluxo de soldagem e a definição dos parâmetros de soldagem. Estas escolhas respeitaram o catálogo do fabricante dos materiais tanto para o par arame/fluxo como os parâmetros de soldagem (ESAB, 2004).

A Segunda etapa do experimento consiste na realização da soldagem e a separação das escórias geradas no final processo, sendo que as mesmas são cominuídas via moinho de bolas para os respectivos ensaios de caracterização.

A etapa final dos procedimentos experimentais consiste na caracterização química por fluorescência de raios X, caracterização mineralógica por difração de raios X e caracterização granulométrica via peneiramento mecânico.

Os procedimentos experimentais são representados pelo esquema da Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma dos procedimentos experimentais.

Fonte: Próprio autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 SOLDAGEM

Após a realização da soldagem, conforme os parâmetros descritos na Tabela 8, foram obtidos cordões de solda com aspectos visuais satisfatórios, além disso, foi gerado 1,20 Kg de escória de fluxo de soldagem. Os aspectos dos cordões de solda e da escória podem ser vistos na Figura 11 e Figura 12 respectivamente.

Figura 11 - Chapa de aço carbono após deposição dos cordões de solda.



Fonte: Próprio autor

Figura 12 - Escórias de fluxo de soldagem.



Fonte: Próprio autor

5.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Através da análise de Fluorescência de raios X (FRX) foi possível obter a composição semiquantitativa da amostra de escória de soldagem ao arco submerso cominuída, ela é apresentada na Tabela 9. Em relação ao material analisado observa-se que os elementos presentes em maior proporção na amostra são o manganês (Mn), alumínio (Al), silício (Si) e o magnésio (Mg), além do cálcio (Ca) e do ferro (Fe). Destaca-se que o Mg e o Al estão presentes na composição do fluxo de soldagem utilizado. Além disso, percebe-se que o Si, Fe e Mn são encontrados tanto na composição do arame como no fluxo.

Na literatura existem estudos de análise química em relação às substâncias presentes na escória de fluxo de soldagem ao arco submerso, Annoni (2011) em seu estudo, obteve resultados que evidenciou a presença de Mn, Al e O (oxigênio) em teores elevados; Fe, Si e Ti (titânio) em quantidade média e baixos teores de Ca, Mg e Zr (zircônia).

Tabela 9 - Resultado da análise qualitativa da amostra.

Elementos	Quantidade (%)
Mn	26
Al	19
Si	18
Mg	13
Ca	11
Fe	10
Tb	1
K	Traços
Ba	Traços
Cr	Traços
Zn	Traços
Ti	Traços
Zr	Traços
Sr	Traços

Fonte: Próprio autor.

Na literatura existem estudos de análise química em relação às substâncias presentes na escória de fluxo de soldagem ao arco submerso, Annoni (2011) em seu estudo, obteve resultados que evidenciou a presença de Mn, Al e O (oxigênio) em teores elevados; Fe, Si e Ti (titânio) em quantidade média e baixos teores de Ca, Mg e Zr (zircônia).

Comparando-se os resultados apresentados pela tabela anterior com aqueles obtidos por Annoni (2011), observa-se que os principais elementos presentes nas amostras ácidas e neutras são basicamente iguais aos obtidos no presente trabalho. Desta forma, pode-se dizer que os resultados adquiridos neste estudo corroboram com a informação encontrada na literatura (ANNONI, 2011), sendo que as pequenas variações nas quantidades e nas diferenças entre as composições analisadas ocorrem devido as diferentes formulações na fabricação dos fluxos utilizados. Além disso, nota-se que não há a presença do oxigênio análise química do presente trabalho, pois o equipamento possui limitações que não permitem a sua identificação.

A Tabela 10 apresenta o resultado da análise qualitativa em relação aos óxidos da amostra de escória cominuída via FRX, nota-se que os principais óxidos presentes no material analisado são a quartzo ou sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3), o óxido de manganês (MnO), óxido de magnésio ou periclase (MgO), o óxido de cálcio (CaO) e o óxido de ferro (Fe_2O_3).

Tabela 10 - Resultado qualitativo em relação aos óxidos da amostra analisada.

Óxidos	Quantidade (%)
SiO_2	24
Al_2O_3	24
MnO	17
MgO	16
CaO	9
Fe_2O_3	7
Tb_4O_7	Traços
K_2O	Traços
BaO	Traços
Cr_2O_3	Traços
ZnO	Traços
TiO_2	Traços
ZrO_2	Traços
SrO	Traços

Fonte: Próprio autor.

Viana (2007) em sua tese, ao analisar quimicamente a escória em relação aos óxidos presentes, obteve resultados mostrando a existência de Al_2O_3 , CaO , SiO_2 , MgO , MnO , Fe_2O_3 , P_2O_5 , SO_3 , TiO_2 e K_2O e traços de outros óxidos.

Confrontando os resultados descritos pela tabela anterior e aqueles obtidos por Viana (2007), observa-se que os principais óxidos presentes na análise da autora são os mesmos existentes na escória deste trabalho.

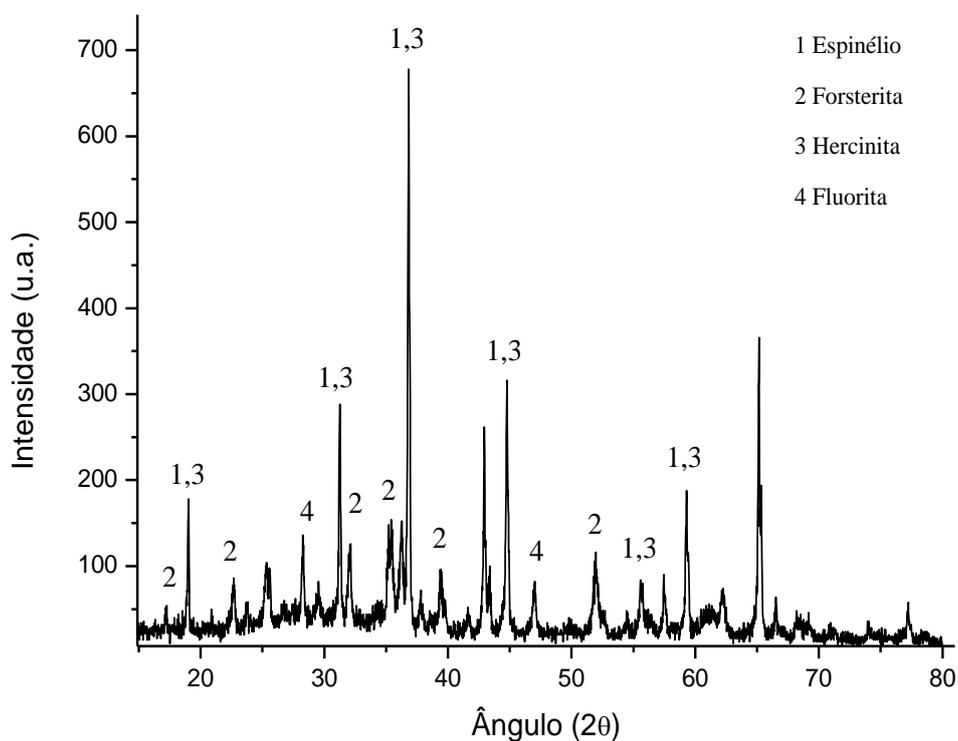
Deste modo, os resultados logrados pela análise quantitativa deste estudo confirmam aqueles encontrados na literatura (VIANA, 2007), diferenciando-se apenas nos óxidos que

estão presentes em pequenas quantidades. Isso ocorre devido as diferentes formulações dos óxidos utilizados na fabricação dos fluxos de soldagem ao arco submerso.

5.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A partir dos dados obtidos pela análise por difração de raios X (DRX), foi possível identificar as fases cristalinas presentes na escória de fluxo de soldagem ao arco submerso, o difratograma da amostra pode ser visto na Figura 13, e com maiores detalhes, no Anexo 1 deste trabalho.

Figura 13 - Difratograma da amostra analisada.



Fonte: Próprio autor.

Os picos observados do difratograma da amostra analisada, foi realizado com o auxílio do *software* X PowderX Versão 2018.01.02. Sendo assim, os picos $17,26^\circ$ (020); $22,70^\circ$ (021); $32,10^\circ$ (130); $35,46^\circ$ (131); $39,46^\circ$ (122); $52,00^\circ$ (240) confirma a presença da Forsterita (Mg_2SiO_4). Os picos $19,04^\circ$ (111); $31,30^\circ$ (220); $36,86^\circ$ (331); $44,82^\circ$ (400); $55,68^\circ$ (422) e (061); $59,36$ (551) comprovam a existência do Espinélio ($MgAl_2O_4$) e da Hercinita ($Fe^{2+}Al_2O_4$) respectivamente, nota-se também que há sobreposição de seus picos. Já os picos $28,30^\circ$ (111) e $47,02^\circ$ (400) revelam o aparecimento da Fluorita (CaF_2)

O aparecimento do espinélio e da forsterita evidencia que a periclase está combinado com a alumina (VIANA, 2007) e com a sílica, além disso, a existência de picos da Hercinita nos mostra que o óxido de ferro presente na amostra também está associado à Al_2O_3 . Por último, o flúor (F) não foi identificado na caracterização química da amostra analisada, devido à limitação do equipamento de análise química, porém na Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos do fabricante, foi informada a presença de fluoretos na composição do fluxo. Dessa forma pode-se confirmar a presença de picos da fluorita pela análise mineralógica. Além disso, pode-se observar a presença de uma fase amorfa na amostra caracterizada, tendo uma relação fase amorfa/cristalina de 0,077; evidenciando que a fase cristalina está mais presente na amostra analisada.

Comparando os resultados obtidos desta análise com aqueles contidos na literatura (MERCADO *et al.*, 2003; VIANA, 2007; VIANA *et al.* 2010, ANNONI, 2011; KUMAR *et al.*, 2013), pode ser observado grande diferenças entres os difratogramas e nos picos dos minerais identificados devido as diferenças entre as formulações dos fluxos aglomerados usados.

5.4 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

A partir da análise granulométrica, via peneiramento à seco, foi possível analisar a distribuição das partículas de 125 g de escória cominuída e desse modo avaliar seu comportamento. Na Tabela 11 são descritos os resultados alcançados nesta análise.

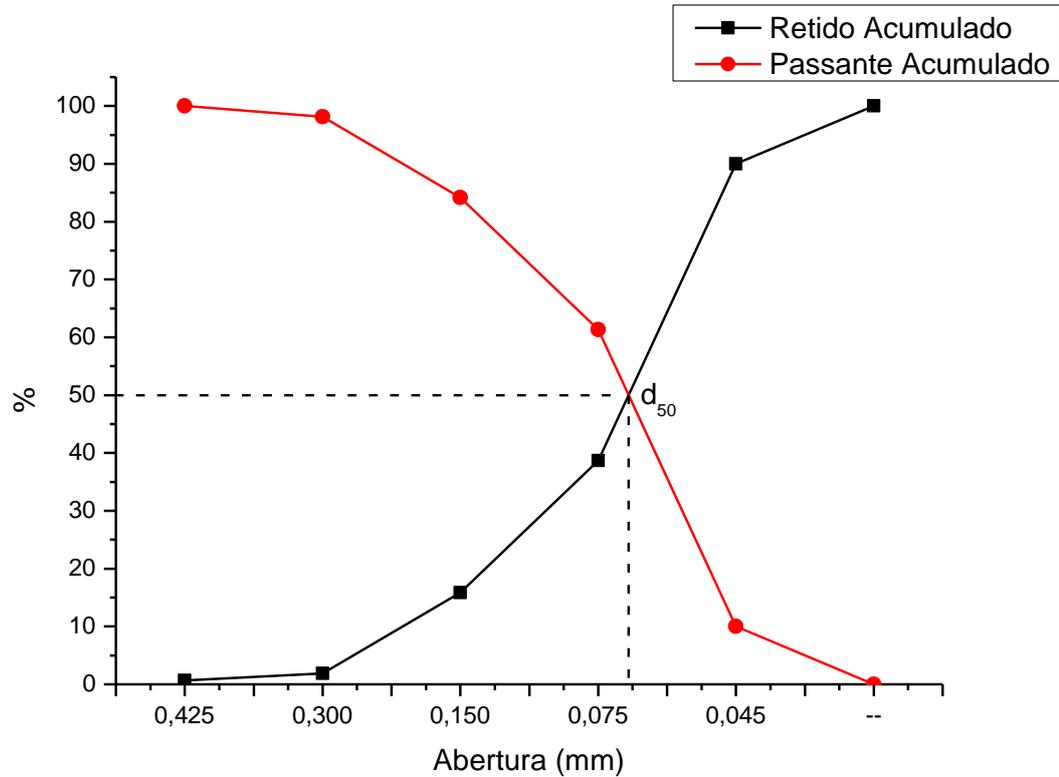
Tabela 11 - Resultado da análise granulométrica da amostra analisada.

MESH	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	Retido Acumulado (g)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
35	0,425	0,83	0,83	0,67	0,67	100
48	0,300	1,51	2,34	1,21	1,88	98,12
100	0,150	17,4	19,74	13,96	15,84	84,16
200	0,075	28,43	48,17	22,82	38,66	61,34
325	0,045	63,98	112,15	51,34	90,00	10,00
FUNDO		124,61	124,61	10,00	100	0

Fonte: Próprio autor.

Com os dados obtidos é possível montar os gráficos de passante acumulado e retido acumulado, ambos em porcentagem, em relação à abertura das peneiras. Na Figura 14 é possível observar o comportamento do peneiramento da amostra analisada, nela percebe-se que o valor do diâmetro médio (d_{50}) das partículas neste ensaio foi de aproximadamente 0,068 mm, esta informação evidencia que quando peneirados 125 g da escória cominuída, grande parte da amostra fica retida na peneira de 0,045 mm.

Figura 14 - Resultado da análise granulométrica da amostra.



Fonte: Próprio autor.

Com o resultado anterior podemos também caracterizar a amostra de acordo com o seu módulo de finura (M.F.) e através da sua dimensão máxima característica (DMC).

De acordo com a norma ABN NBR 7211:2005 o M.F. pode ser calculado com a soma das porcentagens retidas acumuladas, das peneiras da série normal, dividida por 100. E a dimensão máxima característica é aquela cuja porcentagem da massa retida acumulada é igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

Conforme ABNT NBR NM ISO 3310-1:2010 todas as peneiras utilizadas no presente trabalho pertencem à série normal. A Tabela 12 apresenta todos os dados e o módulo de finura de cada amostra.

Tabela 12 - Módulo de finura da amostra analisada.

MESH	Abertura (mm)	Retido Acumulado (%)
35	0,425	0,67
48	0,300	1,88
100	0,150	15,84
200	0,075	38,66
325	0,045	90,00
MÓDULO DE FINURA (M.F.)		1,47

Fonte: Próprio autor.

Como observado, o módulo de finura da amostra é de 1,47 e a dimensão máxima característica das suas partículas é de 0,300 mm. Desta forma, o resultado da tabela anterior confirma aqueles descritos na Tabela 11, pois quanto menor o diâmetro médio das suas partículas, menor será o seu módulo de finura.

5.5 PROPOSTA DE REUTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA

Como visto no item anterior do presente trabalho, podemos reutilizar a escória de fluxo de soldagem ao arco submerso de diferentes formas, desta forma pode-se propor mais uma via para seu reuso.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland, o cimento Portland é um dos materiais construção mais utilizado em todo mundo, sendo que o mesmo é composto por clínquer e adições. O clínquer é constituído por calcário e argila, já as adições são matérias-primas como gesso, escórias de alto-forno, entre outros materiais.

Magalhães (2007) em sua tese fez uma caracterização química e mineralógica de dois tipos de cimento Portland, o cimento Portland CP II E 32 e do Portland CP III 32. A análise química realizada em seu trabalho revelou os principais óxidos presente tais materiais e pode ser vista na Tabela 13.

Tabela 13 - Composição química em óxidos do cimento Portland.

Portland CP II E 32	Portland CP III 32
ÓXIDOS	
SiO ₂	
Fe ₂ O ₃	
Al ₂ O ₃	
CaO	
MgO	

Fonte: MAGALHÃES, 2007, p. 142. (Adaptado).

Comparando os óxidos presentes no cimento Portland com os óxidos identificados pela caracterização química da escória cominuída podemos observar que ambos apresentam os óxidos: SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO e Fe₂O₃. Esta comparação indica certa semelhança entre os materiais quando confrontados em relação aos óxidos presentes.

Desta forma, o autor deste presente trabalho propõe que a escória de fluxo de soldagem processada seja utilizada em ensaios substituindo parcialmente ou totalmente o cimento Portland na formulação da produção de argamassa e/ou do concreto.

6. CONCLUSÃO

- Após realização do processo de soldagem, foram obtidos cordões de solda com aspectos visuais satisfatórios gerando 1,20 Kg de escória de fluxo de soldagem;
- O resultado da análise química realizada neste presente trabalho mostra que elementos químicos como o manganês, alumínio, silício, magnésio e cálcio estão presentes na escória em altos teores. Além disso, os principais óxidos contidos no material analisado são a sílica, alumina, óxido de manganês, óxido de magnésio, óxido de cálcio e o óxido de ferro, corroborado com os dados presentes na literatura;
- Na caracterização mineralógica foram identificados quatro minerais, são eles: espinélio, forsterita, hercinita e a fluorita. A presença do espinélio e da forsterita evidencia que o óxido de magnésio está combinado com a alumina e com a sílica. O aparecimento de picos da hercinita no difratograma nos mostra que o óxido de ferro também está associado à alumina, formando outro tipo de espinélio e a existência da fluorita na análise confirma a presença dos fluoretos que estão presentes na composição do fluxo utilizado;
- A análise granulométrica nos revela que o diâmetro médio das partículas da escória cominuída é de 0,068 mm, além disso, seu módulo de finura e a dimensão máxima característica foram de 1,47 e 0,300 mm respectivamente.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para futuros trabalhos:

- Utilizar a escória cominuída como substituinte parcial ou total do cimento Portland, pois quando caracterizados ambos apresentam os óxidos: SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO e Fe_2O_3 ;
- Realizar caracterização da escória de dois modos diferentes e compará-los:
 - Primeiro seria a caracterização da escória como feito neste trabalho;
 - Segundo seria retirar o restante do fluxo aglomerado que fica na parte superior da mesma e caracterizar apenas a parcela solidificada do cordão de solda.

REFERÊNCIAS

ANNONI, R. **Lixiviação de Escórias de Soldagem a Arco Submerso Visando à Recuperação dos Óxidos de Alumínio e Titânio**. 2011. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7ed. São Paulo, 2002. 28p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa para assentamentos e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-ISO 3310-1**: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 2010. 20 p.

Brasil. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política nacional de resíduos sólidos (PNRS)**. Brasília, DF, 2 ago. 2010.

Carter, G.J. **The reprocessing and re-use of slag as flux in submerged-arc welding** – 1 e 2. The Welding Institute Research Bulletin, 1988. p. 52-55, p. 99-105.

CATÁLOGO – OK Fluxos Aglomerados – ESAB-BR, 2004. 8 p.

Dias, D.P., Paranhos, R.P.R., Barbosa, L.R. (2004) **Escória de fluxo de soldagem como agregado para concreto**. Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social Brasil-NOCMAT.

EVANGELISTA, H.J. **Propriedades Ópticas e Ocorrências dos Principais Minerais Metamórficos**. Ouro Preto, 2011. Curso de Petrologia Metamórfica do Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. (Apostila).

FISP – Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos: OK FLUX 429 – ESAB-BR, 2017. 5 p.

FISP – Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos: OK AUTROD 12.20 – ESAB-BR, 2017. 6 p.

Fortes, C., Araújo, W. **Arco Submerso** – Apostila de Arco submerso – ESAB-BR, 2004. 84 p.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Inventário de Resíduos Sólidos Industriais**: Ano Base 2015. Belo Horizonte, 2016, 52 p. Disponível em: < http://www.feam.br/images/stories/declaracoes_ambientais/inventarios_industriais/Relatório_Inventário_Industria_2016_ano_base_2015_COM_FICHA.pdf >. Acessado em: 23 nov. 2017.

GROENNER, P.E.M. **Reaproveitamento do resíduo de fabricação de consumíveis para soldagem em tijolos de cerâmica vermelha**. 2007. 90 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) - Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

International Center for Diffraction Data – ICDD. Powder Diffraction File 02, PDF-02 Release 2013. 2013.

JÚNIOR, J.N.O. **Desenvolvimento de Suporte de Solda Cerâmica a Base de Resíduo de Escória de Soldagem**. 2014. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.

KUMAR, A., SINGH, H., MAHESHWARI, S. **XRD and DTA Analysis of Developed Agglomerated Fluxes for Submerged Arc Welding**. Journal of Metallurgy. Vol. 2013, 2013. 8 p.

MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Editado pelo autor, Porto Alegre, 1996. 477 p.

MAGALHÃES, A.G. **Caracterização e análise macro e microestrutural e concretos fabricados com cimento contendo escórias de alto-forno**. 2007. 268 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MARQUES, P.V., MODENESI, P.J., BRACARENSE, A. Q. **Soldagem - Fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011. 362 p.

MATTEI, Fabiano. **Desenvolvimento de Equipamento para Estudo de Soldagem por Fricção**. 2011. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MERCADO, A.M.P., DIAZ, P.E., HIRATA, V.M.L. **Chemical and structural characterization of the crystalline phases in agglomerated fluxes for submerged-arc welding**. Journal of Materials Processing Technology, 141, p. 93-100, 2003.

MODENESI, P.J. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**, Belo Horizonte: UFMG, 2012. 172 p. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fisica_da_soldagem1.pdf> Acesso em: 7 nov. 2017.

MODENESI, P.J., MARQUES, P.V. **Introdução aos Processos de Soldagem**, Belo Horizonte: UFMG, 2011. 52 p. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/processo.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2017.

MODENESI, P.J., MARQUES, P.V., SANTOS, D.B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 209 p. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2017.

OGBORN, J.S. Submerged arc welding. In: DAVIS, J.R. et al.(Ed.).**ASM handbook: Welding, Brazing, and Soldering**. Metals Park; American Society for Metals, 1993. p. 202-209.

Ok Fluxos Aglomerados – Catálogo de Fluxos Aglomerados – ESAB-BR, 2004. 8 p.

OKUMURA, T., TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. LTC, Rio de Janeiro, 1982, 461 p.

PAIXÃO, J.F. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais**: Relatório de Pesquisa. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, 2012, 74 p. Disponível em: < http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120927_relatorio_residuos_solidos_industriais.pdf >. Acesso em: 11 nov. 2017.

VIANA, C.E. **Escórias de Fluxo de Soldagem como Agregado Miúdo para a produção de Argamassa de múltiplo uso**. 2007. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.

VIANA, C.E; DIAS, D.P; PARANHOS, R.P.R. **Reciclagem de Escórias de Fluxo de Soldagem na Construção Civil**. In: XXXII CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, Belo Horizonte, out. 2006.

VIANA, C.E; DIAS, D.P; PARANHOS, R.P.R., HOLANDA, J.N.F. Influência da incorporação de resíduo de escória de fluxo de soldagem nas propriedades tecnológicas de argamassa de múltiplo uso e cerâmica vermelha para construção civil. **Cerâmica**, São Paulo, v. 56, n. 337, p. 83-90, 2010.

VIANA, C.E; DIAS, D.P; PARANHOS, R.P.R.. **Welding flux slag recycling for fabrication of multiple use mortar and bricks**. In: XXXIV CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, mai. 2008, São Paulo. p. 18-21.

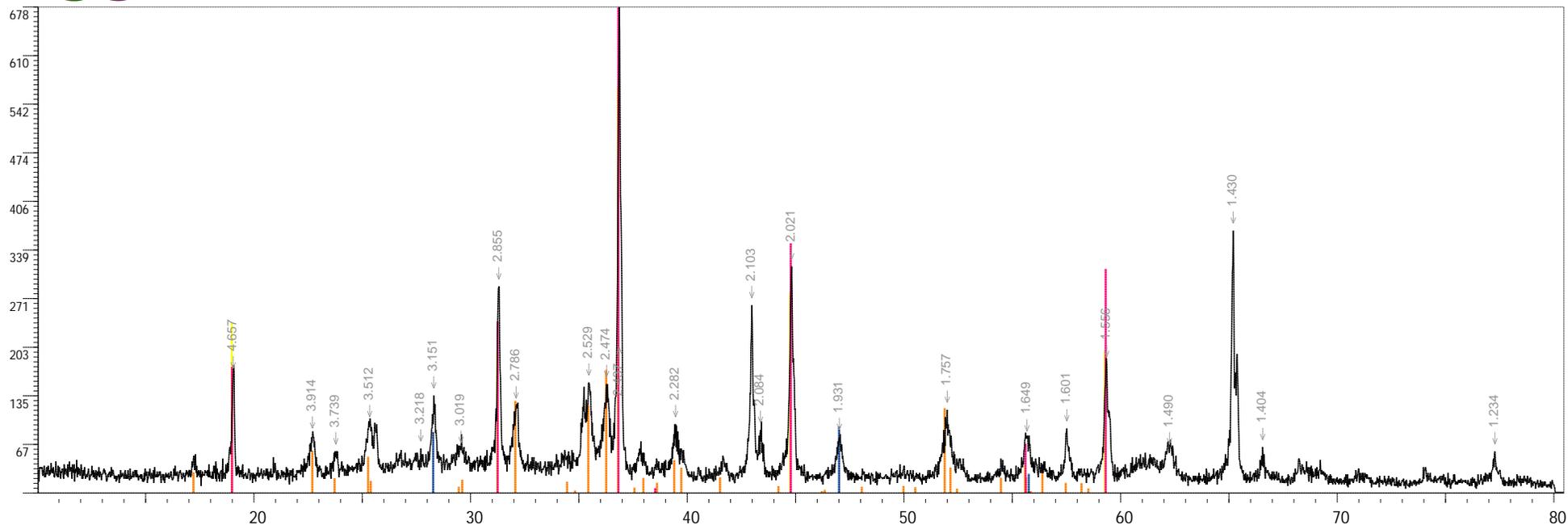
WAINER, E., BRANDI, S., MELLO, F.D.H., **Soldagem: Processos e Metalurgia**. Edgard Blücher, São Paulo, 1992. 494 p.

ANEXO 1 – DIFRATOGRAMA DA AMOSTRA ANALISADA



SAMPLE = ESCÓRIA SAW

XPowderX Ver. 2018.01.02



R-according factor = 0.0290 Global Rho = 2.500(g/cm³) Global Mu/Rho = 44.9(cm² g⁻¹) Amorphous / Crystals relationship = 0.077

Date 16/06/2018 Database : difdata(1.53-70) Setting: Wavelengths : 1.54060 / 1.54440 / 0.47

Set	-File	Phase name	PIR	μ/ρ	% Weight
0	7649	Spinel	6.662	30.2	39.45±1.20
0	376	Forsterite	4.737	89.2	18.84±2.60
0	2896	Hercynite	8.324	35.1	38.42±0.90
0	9454	Fluorite	15.053	115.2	3.29±3.00

Line	Angle	d-Spacing	Counts
1	19.04	4.657	164
2	22.70	3.914	80
3	23.78	3.738	58
4	25.34	3.511	96
5	27.70	3.217	62
6	28.30	3.151	136
7	29.56	3.019	60
8	31.30	2.855	288
9	32.10	2.786	122
10	32.10	2.786	122
11	35.46	2.529	154
12	36.28	2.474	152
13	36.86	2.436	678
14	39.46	2.281	96
15	42.98	2.102	262
16	43.38	2.084	88
17	44.82	2.020	316
18	47.02	1.931	78
19	52.00	1.757	116
20	55.68	1.649	76
21	57.52	1.600	90
22	59.36	1.555	180
23	62.26	1.489	58
24	65.20	1.429	366
25	66.56	1.403	64
26	77.28	1.233	58